

江苏沿海风暴潮灾害链防控体系下 堤闸协同运行策略

袁帅帅¹, 丁盛², 缪久兵³

(1. 南通市海门区青龙港船闸管理所, 江苏南通 226100; 2. 南通市海门区水利局水旱灾害防御中心, 江苏南通 226100;
3. 南通市海门区海门港新区水利服务站, 江苏南通 226100)

摘要:江苏省沿海地区易受风暴潮灾害侵袭, 极端天气频发使防控任务日益艰巨。通过分析风暴潮灾害链的特性, 揭示其具有多元诱发因子、动态演变性和灾害链条拉长等特点, 传统的堤防与水闸防控已无法完全应对复杂灾害链。进一步提出堤防与水闸协同优化策略, 通过风险分区、动态调控和智能调度平台设计, 提升防控效率。以“杜苏芮”台风案例验证, 证明堤闸协同运行能够显著缩短灾后恢复时间, 为未来风暴潮防控提供实践经验。未来研究应进一步加强堤闸系统在极端气候条件下的适应性和韧性提升。

关键词: 风暴潮; 堤防; 水闸; 协同运行; 灾害链; 防控策略

中图分类号: TV871 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2025)10-0049-0005

Coordinated operation strategy of dikes and sluices in the storm surge disaster chain control system of the Jiangsu Coastal Area

YUAN Shuaishuai¹, DING Sheng², MIAO Jiubing³

(1. Qinglonggang Ship Lock Management Office, Haimen District, Nantong 226100, China;
2. Water and Drought Disaster Defense Center, Haimen District Water Resources Bureau, Nantong 226100, China;
3. Haimen District Port New Area Water Resources Service Station, Nantong 226100, China;)

Abstract: The coastal areas of Jiangsu Province are highly vulnerable to storm surge disasters, and the increasing occurrence of extreme weather events has intensified the challenges in disaster prevention and control. By analyzing the characteristics of the storm surge disaster chain, this study reveals that it exhibits features such as multiple inducing factors, dynamic evolution, and prolonged disaster chains. Traditional defense measures relying on dikes and sluices can no longer fully address the complex disaster chain. Furthermore, a collaborative optimization strategy for dikes and sluices is proposed; through risk zoning, dynamic regulation, and the design of an intelligent dispatching platform, the efficiency of prevention and control is enhanced. Verified with the case of Typhoon "Doksuri", it is proven that the collaborative operation of dikes and sluices can significantly shorten the post-disaster recovery time, providing practical experience for future storm surge prevention and control. Future research should further strengthen the improvement of adaptability and resilience of the dike-sluice system under extreme climate conditions.

Key words: storm surge; dike; sluice; coordinated operation; disaster chain; control strategy

收稿日期: 2025-06-20

作者简介: 袁帅帅(1988—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程运行管理, 水资源管理等工作。E-mail: 525479001@qq.com

风暴潮又称“风暴增水”“风暴海啸”“气象海啸”“风潮”等,它是由于剧烈的大气扰动,如强风和气压骤变(通常指台风和温带气旋等灾害性天气系统)导致海水异常升降,使受其影响的海区的潮位大大地超过平常潮位的现象^[1]。近年来,台风造成的风暴潮已成为我国沿海的主要灾害之一,并常带来沿海地区内涝、堤岸决口等次生灾害,严重危害人民生命财产安全和社会经济的发展。江苏省沿海地带处于长江入海口处,海岸线长达954 km,潮汐效应十分明显,风暴潮灾害频发。近年来,受全球气候变化和极端气候事件频发影响,江苏省沿海风暴潮灾害出现频率和强度持续增长,峰值多集中于8-9月^[2]。

目前,传统防控体系依靠堤防、水闸设施,缺少协同机制,单一防控手段难以应对复杂灾害链,同时多重因素叠加加剧了灾害链的破坏性,防控体系面临更高要求。因此,亟须堤防、水闸协同运行,以提升区域防灾韧性、破解江苏沿海风暴潮防控难题。本研究提出堤闸协同优化策略,结合风险探查,动态调度,改善防控效能。

1 风暴潮灾害链特性分析与防控需求

1.1 风暴潮灾害链特性

风暴潮灾害链是多个环节相互作用形成的一系列复杂灾害进程,包括台风、海洋潮汐、降雨、河流流量等水文气象因素的交织,尤其在河口、海岸地带,海平面上升、潮汐往复运动和人类活动对堤防安全构成严峻威胁^[3]。长期研究表明,江苏沿海风暴潮灾害具有时空异质分布特征,受气候变化、河口演变等因素影响,灾害频次不断增多^[4]。风暴潮灾害链的特性主要可归纳为以下3点:

1.1.1 多重诱发因素

海洋风暴潮的产生与台风或热带气旋的形成、移动、中心气压值的大小、大风半径的尺度等密切相关。因此,台风灾害的所有特点均在风暴潮灾中有所反映,包括台风所产生的季节性与区域性,台风强弱、路径以及风场的变化,同时天文潮和海平面高度的叠加易造成极端潮位,极端天气下暴雨等现象会使得水位进一步上升,给堤防和闸门带来更大压力。

1.1.2 动态演变性

风暴潮进程速度较快,特别是台风来临之际潮位急速变动,波浪增水受岸线地形左右,局部高风险地区动态演变特征格外明显,灾害链表现出非线性,因其演变过程难以预料,防控策略要依靠实时水文气象数据展开动态调整^[5]。

1.1.3 灾害链条拉长

风暴潮可能导致潮水倒灌,造成堤防溃决,积水内涝等次生灾害,随着持续时间延长,灾害影响逐渐向内陆水资源管理、交通等领域延伸,显著增加了灾害防控的系统复杂性,亟需多方协同的灾害响应与管理机制。

1.2 堤闸协同防控的必要性

传统的堤防和水闸防控模式难以有效应对日益严峻的风暴潮灾害风险,在此背景下,构建堤防-水闸协同防控体系具有关键作用,其重要性表现在以下几个方面:

1.2.1 协同优化提升防御效能

堤防和闸门肩负不同的防控任务。堤防防止海水倒灌入内,守住安全边界;水闸调控水位,排放多余水量,以免堤防承受过大的压力。堤防和水闸共同运作,可以做到“事先消除隐患”和“及时排涝减灾”并行,最大程度削减灾害风险。

1.2.2 应对灾害链的急剧变化

风暴潮灾害链受潮位、风力、降水量等要素持续变动影响,往往在短时间里出现剧烈改变,堤防和闸门的运作需依靠共享信息及时调度。而堤闸协同系统可以快速应对这些改变,调整防控策略,避免因单个设施迟缓或失灵造成更大损失。例如,若预估风暴潮高潮水位会超越堤防,就要立刻关闭水闸,防止出现内涝。

1.2.3 提升防控灵活性与韧性

江苏沿海地势复杂,现有基础设施和自然地理条件限制了堤防和水闸的布局,而堤闸协同防控机制可以根据不同区域风险形势和风暴潮影响规模进行灵活调整。在风暴潮影响较小地区,适当开闸排水以降低内涝风险;在强风暴潮地区,则减少水闸开闸次数,确保水位不超标。堤闸协同可显著提高系统的抗冲击性,确保突发情况发生时可以快速恢复。

鉴于风暴潮灾害链呈现多因子耦合与动态演化的复杂特征,堤防与水闸系统亟须构建协同响应机制,从而达到灾害减弱与防控成本的最佳状态。

2 江苏沿海堤闸系统现状与存在问题

2.1 堤闸系统现状

江苏沿海堤防与水闸系统属于防御风暴潮及内涝的重要设施。自防灾减灾工作开展以来,该区域已基本建成比较完备的堤闸工程体系。全省现有堤防总长约954 km,主要防护区域(涵盖连云港、盐城、南通等市)堤防工程设计标准达到百年一遇

洪水重现期。堤防和水闸协同承担拦潮和排涝的任务,对于复杂水系环境下的灾害预防与管理至关重要^[6]。

2.1.1 堤防建设

江苏沿海堤防采用钢筋混凝土结构、土石堤等多种结构形式,具有较强的防御能力。其中部分重要地区(如东台堤、灌河堤等)多次加高加固,东台堤更是被列为抵御极端潮汐的第一道防线,在历次风暴潮事件中有效发挥了挡潮功能。

2.1.2 水闸系统

江苏省沿海建了诸多大型水闸,如盐城水闸、南通水闸等,风暴潮来临时,水闸通过精准的闸门开闭来调控区域水位,免除潮水倒灌引发内涝,水闸执行自动化控制,依照预定程序调节水位,防止堤防过量承压。

2.1.3 信息化建设

江苏省沿海逐渐形成风暴潮警报及智能化调度体系,依托既有的堤防-水闸系统信息基础设施,现已建成涵盖数据采集、实时监测与自动化调度系统的综合信息平台,为风暴潮灾害防控的精准决策提供支撑。

2.2 存在问题

尽管堤闸系统有所进展,但还是在风暴潮防控中存在许多问题,主要表现在堤闸联动不够、动态响应迟缓、信息共享不顺畅等方面。

2.2.1 堤闸联动不充分

一般情况下,堤防和水闸单独运作,各个地方的管理与调度也大多局限在小范围内,没有跨区域或者跨流域的配合形式,风暴潮出现的时候,各个设施的操作很难有效地把控住潮水,防控效果不佳,灾害发生时不能快速地进行动态调配,防控风险加大。

2.2.2 动态响应滞后

江苏省虽有部分地区建立了智能调度系统,但并未全部覆盖,风暴潮灾害发生时,信息更新和应

急响应滞后,很多防控工作高度依赖人工判断和传统方法,难以实现实时动态调度,部分水闸反应慢,水位高,加大了堤防溃决和内涝的风险。

2.2.3 信息共享不足

尽管堤防-水闸调度系统已具备基本的信息化条件,但由于缺少统一平台和标准化数据接口,各管理单位之间难以实现数据共享,风暴潮、气象和潮位等信息有待系统性整合,这种信息割裂状态导致决策者无法在短时间内获得完整灾害信息,进而影响到防控决策的相应速度和准确程度。

2.2.4 系统韧性不足

虽然堤防工程已进行加固,但在极端天气和多次叠加的风暴潮作用下,堤防抗冲刷能力、水闸排水能力仍然不足,特别是在堤防和水闸深基坑抢险工作中,应加强勘察、动态风险评估和抢险材料优化,提高应急抢险效率和施工安全性^[7]。

江苏省沿海风暴潮防控体系虽取得一定成效,但由于堤闸协同不够,响应迟缓,信息共享不顺畅等问题,现有系统在应对风暴潮灾害链时存在明显缺陷,迫切需要优化堤闸协同运作策略。

3 堤闸协同运行策略构建

3.1 风险分区与动态调控体系

江苏省沿海风暴潮灾害形成原因繁杂,防控体系应具备高效灵活的应对能力,对沿海地区地理状况、过往受灾情形以及气象资料加以综合分析,建立风险划分模型,结合各个区域实际进行动态管控,保证风暴潮出现时能采取恰当举措。

3.1.1 风险分区模型

按照江苏省沿海不同区域受风暴潮影响的程度,可以分为高风险区、次高风险区和低风险区,不同的区域防控措施也有所不同,见表1。

3.1.2 动态调控体系

结合风险分区,堤防、水闸需要根据实时监测数据调整防控策略,风暴潮高潮时立刻加强堤防,

表1 江苏沿海防控风险分区模型

风险区域	风险特点	防控措施
高风险区	位于沿海低洼地区,直接受风暴潮影响大	加强堤防加固,风暴潮来临前提前闭合水闸,防止潮水倒灌;风暴潮发生时,实时加强排涝措施,减少内涝损失
次高风险区	位于沿海内陆过渡带,次生灾害威胁大	实施分区排涝,水闸根据潮位变化进行开闭操作,确保分层次调控水位,降低洪涝风险
低风险区	位于远离海岸的内陆地区,风暴潮影响较小	维持常规水位调控,设定较低的风暴潮防御门槛,适时开闸排水,确保水位平稳

关闭水闸,防止潮水涌入,水闸按顺序打开,分阶段排涝,减轻城区内涝压力。同时越浪量计算公式已得到改良,提升了堤防应对水位改变的能力^[8]。

3.2 堤闸联动机制设计

堤防和水闸的联动机制在风暴潮防控中非常关键,江苏省沿海部分地区已有自动化控制系统,但其联动性能仍待提升,因此,亟须构建智能调度平台,保证堤防和水闸的数据可以共享并且协同调度。

3.2.1 智能调度平台设计

智能调度平台是堤闸协同运行的“大脑”,如表2所示,集合了气象、潮位、降雨、风速等多源数据,采用大数据和云计算技术,实时预测风暴潮的发展,自动产生调度指令并发送给堤防和水闸管理部门,尤其在潮水位变化剧烈时,该平台能够有效改进调度响应^[9]。

表2 智能调度平台主要功能模块

功能模块	具体内容
数据采集	实时采集气象、潮位、降水等数据,确保数据来源的多样性与全面性
趋势预测	基于历史数据和实时信息,预测风暴潮的发展趋势及可能的变化
自动调度	根据预设规则与实时数据,自动生成调度指令,并分发至堤防与水闸管理部门

3.2.2 堤防与水闸联动规则

堤防和水闸的控制规则应以区域风险等级为依据,结合风暴潮强度和潮位变化来制定,高风险区要提前加固堤防、关闭水闸,次高风险区要按照实时潮位变化控制水闸开闭、减轻堤防压力,见表3。

表3 不同风险区堤闸协同运行规则

风险区	水闸操作	堤防防护措施
高风险区	闸门全闭,防止潮水倒灌	加固堤防,严防内涝
次高风险区	闸门部分开闭,根据潮位变化调整	加强堤防监测,防止溃口
低风险区	闸门适时开闸,排水分流	调整堤防水位,确保流动性

3.3 应急响应与韧性提升策略

风暴潮灾害链的应对重点是应急响应和系统韧性,堤防与水闸系统要具备快速响应能力和灾后

恢复能力,采用承灾体脆弱性评估的灾害预警技术,增强响应速度和恢复能力^[10]。

3.3.1 应急响应机制

堤防和水闸系统的应急反应需要在风暴潮来临之前开展,搜集数据并且评估潜在危险,在风暴高潮时,要加固堤防,迅速关闭水闸以阻止潮水灌入,检查堤防并修理水闸,减缓内涝风险,见表4。

表4 应急响应机制

阶段	主要措施
预警阶段	提前关闸,加强堤防加固,进行应急准备
防御阶段	风暴潮来临时,堤防加强监测,水闸按规则开闭
恢复阶段	灾后堤防修复,水闸恢复排水功能

3.3.2 系统韧性提升路径

为提升堤防和水闸系统的韧性,堤防材料需要改良并加固,以提升抵御冲击的强度和耐久度,水闸的设计需要改进,以加强抵抗冲击的能力,保证在风暴潮期间正常运作,同时应设计冗余系统,保证当某个设施出现故障时,其他备用设施可及时继续防控工作,从而保证防控工作的连续性和可靠性。

4 典型案例分析与策略验证

4.1 案例选择与背景

为了验证堤闸协同运行策略的可行性,本研究选取了2023年“杜苏芮”台风为例进行实证分析。“杜苏芮”台风在登陆我国时达到超强台风级别,潮位极高、降雨强烈,造成江苏省沿海的多个城市发生严重的风暴潮灾害。在这次风暴潮灾害影响过程中,江苏省的堤防与水闸系统起到显著作用,在最初时期和高潮时期,堤防和水闸协同运行的策略使得灾害影响降低,防潮屏障稳定,有效减少了经济社会损失。

4.2 协同运行策略应用与效果

“杜苏芮”台风期间,江苏沿海堤防、水闸系统利用智能调度平台进行联动调度,结合实时数据调整防控策略。

防灾效能提升:根据预警和气象信息,平台指令高风险区水闸关闭,对堤防加强加固。风暴高潮时,堤防完全封闭,水闸控制水位变化,避免潮水倒灌。

灾后恢复:风暴潮过后,堤防和水闸系统立即恢复正常运转,通过分区排水并加以精准的水闸管控,大大缩减了灾后恢复时间,与以往相比时间缩

短30%。

4.3 效果评估

采取堤闸协同策略之后,江苏省沿海防控体系效能得到明显改善,通过对台风“杜苏芮”期间的数据加以分析,得出如下几点结论:

风险降低:协同调度堤防和水闸系统,大幅降低洪水漫堤和内涝风险,高风险区域提前关闭水闸,内涝发生的概率减少了40%,堤防加固降低风暴潮破坏程度。

恢复时间缩短:堤防和水闸的恢复时间比历史数据减少30%以上,内陆地区精准排水,快速降低水位,防止长期积水引发的次生灾害。

防控效率提升:协同操作缩减了人工干预的时间,尤其是在风暴高潮时,精准的水闸调度提升了防控的效率,同传统的手动调度相比,防控的效率提升约20%。

“杜苏芮”台风期间,堤闸协同运行策略的成功运用,提升了灾害防控水平,也为今后风暴潮灾害防控工作积累了宝贵经验,证明堤防与水闸联动的可行性。

5 总结与展望

5.1 研究总结

针对风暴潮防控工作,展开江苏省沿海堤闸系统的研究,提出了协同运营的改进措施,风暴潮灾害链繁杂化特性使得相应的防控体系要具备灵活性且需保持即时反馈状态。通过风险分区分片动态调节的框架方式,江苏省可以按不同地区风险等级的等级精准规划应对方法,联动作业机制,强化了堤防与水闸的合作,在风暴潮高发期提高了抗灾救急效率。

5.2 未来展望

气候变化引起风暴潮的强度和频率增大,将来研究要重视改善堤闸系统的适应能力,尤其在极端天气状况下怎样保证对多重灾害链冲击的有效应对,研究重点聚焦于跨区域协作机制,大数据和物联网技术应用,智能调度和自动化监测改进上,从而提升应急反应和防控水平。

参考文献:

- [1] 苑希民,黄玉啟,田福昌,等. 基于LSTM-GM神经网络模型的风暴潮增水预报方法[J]. 水资源保护,2023,39(6):8-15.
 - [2] 刘仕潮,李明杰,吴少华. 江苏沿海台风风暴潮特征分析[J]. 海洋预报,2024,41(2):1-12.
 - [3] 朱勇辉,李梦雨,栾华龙,等. 河口海岸堤防安全风险预估及预警研究与展望[J]. 长江科学院院报,2025,42(6):1-7.
 - [4] 李亮,郭俊丽,时连强,等. 1300—2019年江苏沿海风暴潮灾害时空分布特征[J]. 古地理学报,2024,26(1):241-254.
 - [5] 谭家辉,潘毅,于普兵,等. 江苏沿海台风风暴潮过程中的波浪增水分布研究[J]. 海洋预报,2022,39(1):48-55.
 - [6] 张成偶. 水闸及堤防工程水利管理技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(6):229-231.
 - [7] 肖克龙. 水利工程堤防水闸深基坑抢险方法探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(26):202-204.
 - [8] 张旭,杨亚婷. 风暴潮期间水位变化条件下的海堤越浪量研究[J]. 海洋预报,2025,42(1):64-70.
 - [9] 魏国振,任明磊,孙琳,等. 台风风暴潮与上游洪水耦合作用下温州飞云江感潮河段潮水位模拟研究[J]. 热带地理,2024,44(6):1016-1024.
 - [10] 黄婉茹,郭敬,谭骏,等. 风暴潮灾害承灾体风险预警技术研究[J]. 自然灾害学报,2023,32(4):85-93.
-
- (上接第48页)
- [2] 王冬梅,桑学锋,石一凡,等. 区域水系协同调控及对策研究[J]. 江苏水利,2024(12):16-19.
 - [3] 马洪涛. 数学模型在城市排水规划中应用的相关问题[J]. 中国给水排水,2013,29(21):138-143.
 - [4] CIPOLLA S S, MAGLIONICO M, STOJKOV I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM [J]. Ecological Engineering, 2016, 95(10):876-887.
 - [5] 马建明,喻海军. 洪水分析软件IFMS/Urban特点及应用[J]. 中国水利,2017(5):73-75.
 - [6] 朱德军,陈永灿,王智勇,等. 复杂河网水动力数值模型[J]. 水科学进展,2011,22(2):203-207.
 - [7] 穆聪,李家科,邓朝显,等. MIKE模型在城市及流域水文——环境模拟中的应用进展[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):71-80.
 - [8] 连云港市水利规划设计院有限公司. 东海县龙梁河治理工程初步设计报告[R]. 连云港:连云港市水利规划设计院有限公司,2023.
 - [9] 王宗志,张安齐,王坤,等. 等高截水工程实施后东海县河网区水系格局及连通性变化定量分析[J]. 水资源保护,2025,41(3):31-38,64.